На правах рукописи

ХАБИБУЛЛИН ИЛЬМИР ИЛЬДАРОВИЧ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ДВУХПОЛОСТНЫМИ ДИФФУЗОРНЫМИ ВЫЕМКАМИ

Специальность: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника;

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева - КАИ» (КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева) на кафедре «Теплотехники и энергетического машиностроения».

Научный руководитель - кандидат технических наук
Ильинков Андрей Владиславович.

Научный консультант - доктор технических наук,
профессор Щукин Андрей Викторович.

Официальные оппоненты - Дмитриев Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» кафедра «Теоретических основ теплотехники», заведующий;

- Моренко Ирина Вениаминовна, кандидат технических наук, ФГБУН «Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук» лаборатория «Моделирования технологических процессов», старший научный сотрудник.

Ведущая организация - ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет».

Защита состоится “21” декабря 2016 г. в 12^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева - КАИ» (КНИТУ-КАИ) по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ», а также автореферат и диссертация размещены на сайте ФГБОУ ВО ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ»: http://www.kai.ru

Автореферат разослан ___ _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка энергосберегающих технологий в энергомашиностроении, создание эффективных систем охлаждения для высокотемпературных газотурбинных установок и двигателей, разработка компактных и экономичных теплообменных устройств непременно связаны со снижением потерь энергии на прокачку теплоносителей. Одним из путей создания экономичных теплообменников, систем охлаждения двигателей и энергоустановок является использование пристенной интенсификации теплообмена. Задача нанесенных на теплообменную поверхность элементов регулярной макрошероховатости для пристенной интенсификации конвективного теплообмена состоит в разрушении образовавшегося пограничного слоя, турбулизации пристенного течения и генерации крупномасштабных вихревых структур.

Промышленное освоение таких способов интенсификации конвективного теплообмена требует не только решения технологических вопросов, но и разработки инженерных методов расчета теплогидравлических характеристик теплообменных каналов с нанесенными на их поверхность пристенными интенсификаторами, например, сферическими выемками отрывного типа (СВОТ). Анализ многочисленных публикаций по данной тематике показывает, что вклад самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур (СКВС) в общий процесс интенсификации теплообмена сферическими выемками отрывного типа невелик. Поэтому тема диссертационной работы, включающая в себя разработку пристенного интенсификатора теплообмена с высокой тепловой эффективностью, основанной на активизации СКВС, исследование теплообмена и гидродинамики на теплообменной поверхности с такими интенсификаторами представляется *актуальной*.

Цель работы: Повышение тепловой эффективности пристенной интенсификации теплообмена на турбулентном режиме течения для теплообменных аппаратов, систем охлаждения двигателей и энергоустановок**.**

Задачи исследования:

1. Обосновать выбор схемы и формы пристенного интенсификатора теплообмена и на этой основе разработать интенсификатор повышенной тепловой эффективности (двухполостная диффузорная выемка - ДДВ).

2. На разработанном соискателем экспериментальном стенде, для турбулентного режима течения исследовать теплоотдачу и гидравлическое сопротивление канала с матрицей ДДВ и получить соответствующие уравнения подобия.

3. Экспериментально определить коэффициент давления в ДДВ и СВОТ. На этой основе сравнить характер продольного градиента давления в возвратном течении этих выемок; установить рациональные значения высоты ребра-разделителя полостей в ДДВ. На основе визуализационных экспериментов установить режимы течения в ДДВ, классифицированные по диапазонам значений чисел Рейнольдса, установить основные параметры самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур, образующихся в ДДВ.

4. На основе выполненных исследований сформулировать физическую модель интенсификации теплообмена в предложенной соискателем выемке; проанализировать тепловую и энергетическую эффективность ДДВ в сравнении со СВОТ и другими широко используемыми пристенными интенсификаторами теплообмена.

5. Разработать рекомендации для расчета теплообменных каналов с использованием ДДВ на турбулентном режиме течения и продемонстрировать их возможности на примере сравнительных расчетов охлаждаемых турбинных лопаток.

Научная новизна.

1. Разработан и защищен двумя патентами Российской Федерации пристенный интенсификатор теплообмена повышенной тепловой эффективности «Двухполостная диффузорная выемка». В отличие от традиционной сферической выемки отрывного типа, в предложенной выемке непрерывно генерируются две самоорганизующиеся крупномасштабные вихревые структуры, а вторая часть возвратного течения имеет диффузорный характер.

2. Получены новые данные по средней теплоотдаче на пластине с матрицей таких выемок. Установлено, что предложенный соискателем интенсификатор значительно превосходит другие известные пристенные интенсификаторы теплообмена по уровню достигаемой теплоотдачи в канале при прочих равных условиях.

3. Впервые получены опытные данные по структуре потока в двухполостной диффузорной выемке, по режимам течения и гидравлическому сопротивлению канала с такими выемками; выявлены основные параметры самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур, образующихся в этих выемках (протяженность вихревых структур, координаты расположения их эпицентров, угол раскрытия конуса вихревых структур и угол выхода их из выемки). Установлена рациональная высота ребра-разделителя полостей ДДВ.

4. Сформулирована физическая модель высокого уровня интенсификации теплообмена в каналах с ДДВ; впервые исследованы тепловая и энергетическая эффективность интенсификации теплообмена двухполостными диффузорными выемками. Разработаны рекомендации по расчету и проектированию ДДВ применительно к теплообменникам и системам охлаждения ГТД и ГТУ. Высокая эффективность охлаждения с такими интенсификаторами теплообмена подтверждена сравнительными расчетами температурного состояния охлаждаемых турбинных лопаток.

Автор защищает:

1. Схему эффективного пристенного интенсификатора теплообмена «Двухполостная диффузорная выемка», на которые автором получены два патента РФ, в которой на турбулентном режиме течения непрерывно генерируются две самоорганизующихся крупномасштабные вихревые структуры, а вторая часть возвратного течения имеет диффузорный характер.

2. Результаты опытных исследований теплоотдачи и гидравлического сопротивления в канале с двухполостными диффузорными выемками.

3. Результаты визуализационных экспериментов и физическую модель, позволившие обосновать более высокий уровень интенсификации теплообмена на турбулентном режиме течения, по сравнению со сферическими выемками отрывного типа и другими пристенными интенсификаторам теплообмена при прочих равных условиях.

4.Комплекс геометрических параметров самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур ДДВ, полученный на основе визуализации течений в их полостях. Рациональное значение относительной высоты ребра-разделителя полостей.

5.Тепловую и энергетическую эффективность двухполостных диффузорных выемок, рекомендации по выбору геометрических и режимных параметров двухполостных диффузорных выемок и результаты сравнительных расчетов охлаждаемых турбинных лопаток с исследованными и другими пристенными интенсификаторами теплообмена.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты позволяют понять принципы конструирования эффективного пристенного интенсификатора теплообмена, механизм получения на этой основе более высокой теплоотдачи, чем у известных пристенных интенсификаторов, его функциональные особенности по сравнению с традиционной сферической выемкой отрывного типа. Разработанные рекомендации позволяют рассчитать систему охлаждения двигателей, энергоустановок или теплообменники

высокой тепловой эффективности. Полученные опытные данные позволяют верифицировать математические модели для расчета теплоотдачи применительно к разработанному соискателем интенсификатору теплообмена. Практическая значимость состоит в передаче на предприятия АО КМПО, г.Казань, АО НИИТурбокомпрессор, г.Казань и ООО ИВЦ Инжехим, г. Казань рекомендаций по расчету и проектированию эффективнного пристенного интенсификатора теплообмена «Двухполостная диффузорная выемка», на который соискателем получено два патента РФ. Полученные в диссертации результаты внедрены в учебный процесс (курс лекций по дисциплине «Расчет и проектирование высокотемпературных охлаждаемых ГТД» для специальности «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели» 140503 (101400), направление «Энергомашиностроение» 140500. Материалы диссертационной работы вошли в технический отчет по Договору № 14.Z50.31.0003, заключенного в рамках реализации Постановления Правительства РФ №220 от 9 апреля 2010 года по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования, научные учреждения государственных академий наук и государственные научные центры Российской Федерации (ведущий ученый С.А. Исаев), а также в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ в сфере научной деятельности по проекту № 3475, номер госрегистрации 115020430033.

Достоверность и обоснованность: результаты исследований получены на сертифицированном оборудовании; показана воспроизводимость результатов исследований; измерения проводились приборами, имеющими свидетельства о государственной поверке в соответствующих организациях; выполненные соискателем тестовые эксперименты по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению подтверждаются известными каноническими уравнениями, широко применяемыми в теории и практике теплофизического эксперимента.

Личный вклад автора состоит: в разработке экспериментальных стендов; в личном выполнение тестовых опытов и основной программы экспериментов по теплоотдаче, гидравлическому сопротивлению и по визуализации течений; в проведении обработки опытных данных, принятии участия в проведении анализа результатов экспериментов, в разработке рекомендаций для расчета и проектирования систем охлаждения турбинных лопаток с помощью исследованных интенсификаторов теплообмена; в

формулировке выводов; в расчетном сравнительном анализе температурного состояния турбинных лопаток и написании научных статей.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и получили одобрение на XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену, г. Минск, 23-26 мая 2016 г.,V международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках»., г. Казань, 19-21 октября 2015 г., XX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках», г. Звенигород, 24-29 мая 2015 г., Шестой Российской национальной конференции по теплообмену, г. Москва, 27-31 октября 2014 г., IX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, г. Казань, 9-11 сентября 2014 г., X Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, г. Казань, 13-15 сентября 2016 г., Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», г. Самара, 22-24 июня 2016 г., Научно-практической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение», г. Калуга, 16-18 мая 2016 г., Международной молодежной научной конференции «XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых)», г. Казань, 19-21 октября 2015 г., VII международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке», г. Москва, 29 июля 2014 г., №2.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, включая публикации двух патентов. Две статьи опубликованы в рекомендуемых ВАК журналах.

Соответствие диссертации научной специальности.

Диссертация соответствует специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» *по формуле специальности:*

1. Процессы переноса тепла и массы в сплошных средах.
2. Выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции.
3. Обоснование и проверка методов интенсификации тепло- и массообмена.

По областям исследования:

1. Экспериментальные и теоретические исследования однофазной вынужденной конвекции.
2. Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка использованной литературы. Работа изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 5 таблиц. Список использованной литературы включает 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обоснована актуальность темы исследования, отмечены ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе выполнен обзор научно-технической литературы по исследованию пристенной интенсификации теплообмена. Проанализированы работы: Ю.Ф. Гортышова, И.А. Попова, А.В. Щелчкова; В.М., Быстрова, С.А. Исаева; Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичты, А.И. Леонтьева; Э.К. Калинина, Г.А. Дрейцера, С.А. Ярхо; В.К. Мигая; В.И. Терехова; А.А. Халатова, Г.И. Кикнадзе, А.П. Козлова, Г.П. Нагоги, В.В. Олимпиева, Я.П. Чудновского, М.А.Готовского, Ф.Н.М.Брауна, П.В.Бирмана и Дж.К.Харвея, Р. Мехты, К.Вигхардта, Л. Тилмана, Р.С.Банкера, К.Ф.Доннеллана, Х.-К. Муна, P.M. Ligrani и др, C.N. Jordan, L.M. Wright, G. Sandmaer и др. В диссертации цитируются авторы других многочисленных журнальных статей.

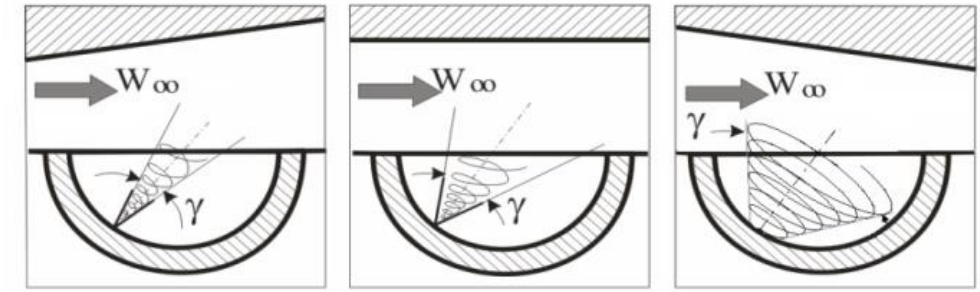
Выполненный в первой главе диссертации анализ опубликованных работ показал, что при исследовании интенсификаторов теплообмена одной из важных задач является изучение структуры потока, обтекающего теплообменную поверхность, условий образования и развития вихревых структур. В работе [Гортышова Ю.Ф., Попова И.А. и др.] был выполнен анализ результатов опубликованных исследований о вкладе самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур (СКВС) в интенсификацию теплообмена сферическими выемками отрывного типа (СВОТ) с относительной глубиной $h/d > 0{,}1\ldots0{,}2$. Было показано, что вклад СКВС в интенсификацию теплообмена на поверхности с СВОТ незначителен.

Таким образом, средством достижения сформулированной цели был поиск вариантов увеличения мощности крупномасштабных вихревых структур в выемке отрывного типа. В связи с этим, нами были использован полученный ранее в КНИТУ-КАИ (1995г.) положительный эффект увеличения теплоотдачи при обтекании полусферической выемки внешним ускоряющимся потоком (рисунок 1, а, [А.В. Щукин и др.]).

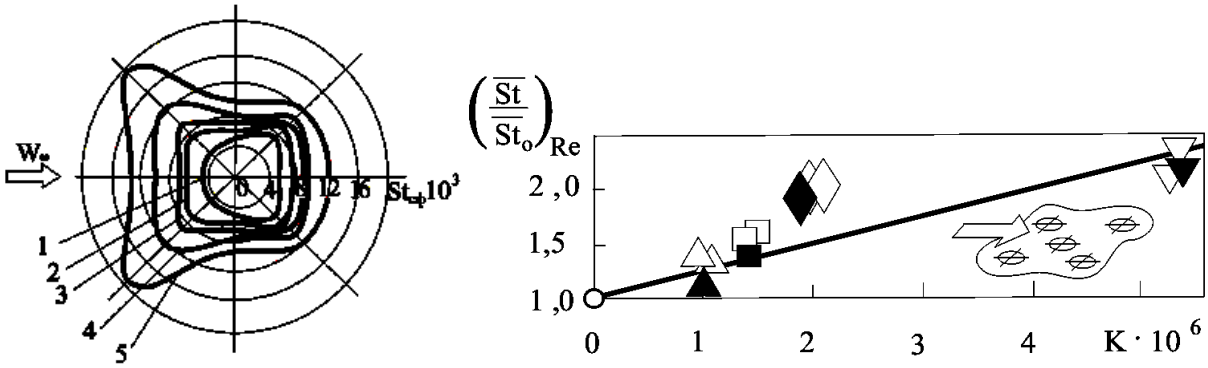
Из этих данных следовало, что при увеличении внешнего ускорения потока в полости СВОТ существенно возрастает теплоотдача (рисунок 1,б), где К - коэффициент ускорения потока. Особенно – в области СКВС (рисунок 1,в), где

$$K = (\nu/w_\infty^2)/[(dw_\infty)/(dx)].$$

Визуализационные опыты показали, что в этом случае интенсификация теплоотдачи сопряжена с существенным увеличением мощности СКВС. Авторы объясняют этот положительный эффект увеличения теплоотдачи в полусферической выемке релаксацией - снижением интенсивности ускорения возвратного течения в СВОТ.



а



б в

Рисунок 1. Результаты исследований полусферической выемки при обтекании ее потоком с продольным градиентом давления: а – влияние продольного градиента давления на мощность СКВС; б – местная относительная теплоотдача в полости СВОТ при ускоряющимся внешнем потоке: 1 – К = 0; 2 - $1{,}04\cdot10^{-6}$; 3 - $1{,}4\cdot10^{-6}$; 4 - $1{,}7\cdot10^{-6}$; 5 - $5{,}2\cdot10^{-6}$; в- относительная средняя теплоотдача в одиночной СВОТ и в матрице при ускорении внешнего потока

В конце первой главы сформулированы задачи исследования.

Во второй главе обосновывается выбор схемы и формы разработанного на этой основе пристенного интенсификатора теплообмена повышенной тепловой эффективности (двухполостная диффузорная выемка - ДДВ). Описываются физические причины ожидаемого дополнительного прироста теплоотдачи в выемке и за ее пределами. Приводится описание экспериментального стенда для исследования ДДВ, объектов исследования, методики проведения экспериментов и обработки опытных данных. Даны значения относительных погрешностей получаемых результатов.

Из анализа изложенных в первой главе результатов исследований было принято решение перенести интенсифицирующее воздействие ускоряющегося внешнего потока, обтекающего выемку, в полость выемки. Кроме этого, было принято решение выполнить выемку двухполостной формы - с двумя непрерывно функционирующими вихревыми структурами. Последовательность выполняемых действий по модернизации СВОТ для получения в ней дополнительного интенсифицирующего эффекта продемонстрирована на рисунке 2. В этом заключается суть решения первой задачи выполняемого исследования.

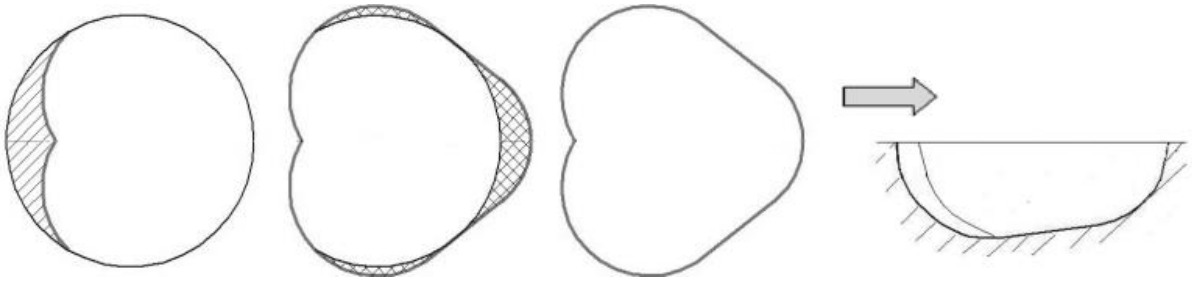


Рисунок 2. Алгоритм создания нового пристенного интенсификатора теплообмена: а – установка в СВОТ ребра-разделителя полостей; б – придание выемке в плане диффузорной формы для возвратного течения; в – окончательный вид ДДВ в плане; г – форма продольного сечения ДДВ с диффузорной донной поверхностью для возвратного течения и ребром-разделителем полостей

Исследование интенсификации теплообмена с применением двухполостных диффузорных выемок осуществлялось опытным путем на разработанной экспериментальной установке (рисунок 3).

Экспериментальная установка представляла собой канал прямоугольного сечения 30х300мм с предвключенным участком и плавным входом. Относительная высота канала $H/D_г$=0,55, где $D_г$ =0,054 м.

Поток воздуха создавался центробежной воздуходувкой 1, работающей на всасывание. Расход воздуха, поступающего в опытный участок 2, регулировался заслонкой 3 и измерялся стандартной диафрагмой 4.

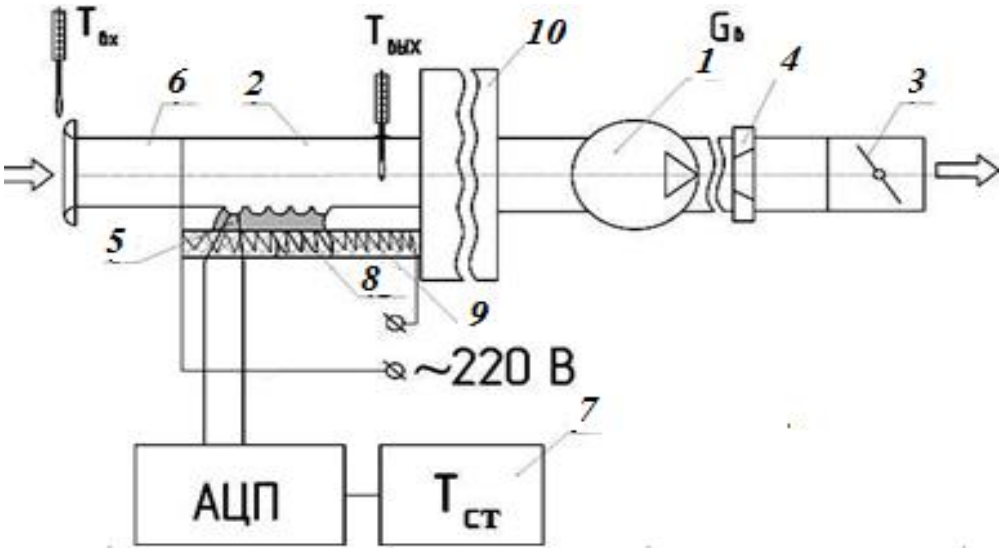
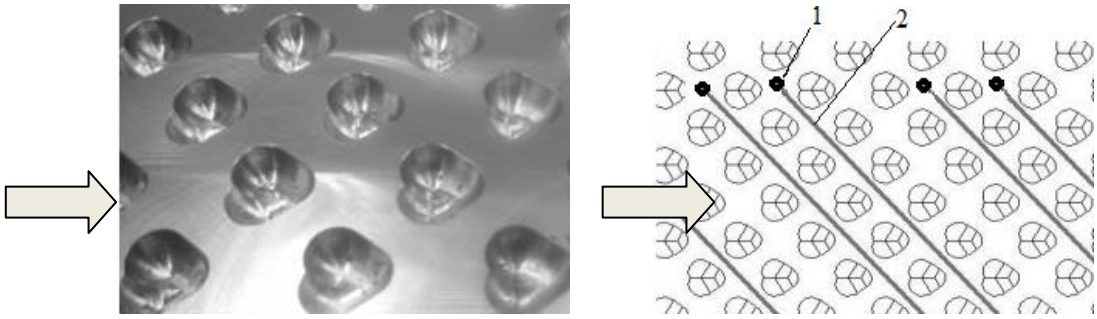


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки для исследования средней теплоотдачи на пластине с ДДВ

В нижней части опытного участка 2 установлена пластина 5 с ДДВ - объект исследования (рисунок 4). Для тестовых экспериментов устанавливалась гладкая пластина. Пластина выполнена из алюминиевого сплава. На ее рабочей поверхности заподлицо установлены 16 хромель-алюмелевых термопар диаметром 0,2 мм. Метод определения коэффициента теплоотдачи – электрометрический. При обработке опытных данных учитывались потери теплоты в сопряженные элементы опытного участка и тепловое сопротивление контакта между объектом исследования (теплообменной пластиной) и медной пластиной, предназначенной для выравнивания теплового потока по площади теплообменной пластины.



а б

Рисунок 4. Объект исследования – фрагмент матрицы с двухполостными диффузорными выемками: а - фрагмент общего вида теплообменной пластины (всего - 711 выемок); б -схема фрагмента теплообменной пластины с поверхностными термопарами, где 1 – спай термопары, 2 – уложенные в канавки термопарные провода

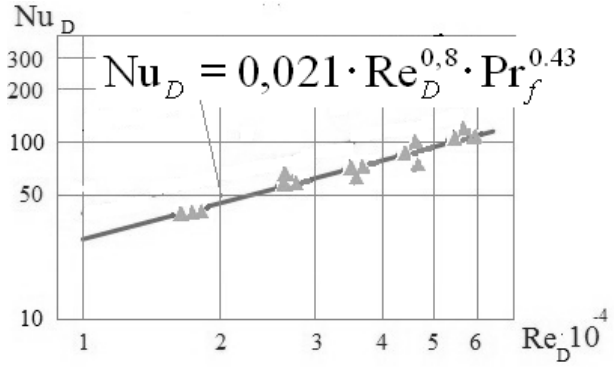
При проведении эксперимента использовалась следующая измерительная аппаратура: сигналы термоЭДС от термопар измерялись с помощью внешнего модуля АЦП типа E-270 USB; давления регистрировались преобразователями давления ПРОМА ДДМ-40 ДИ и ПРОМА ИДМ-0,6 ДД; датчиком для

измерения давления служила трубка Пито-Прандтля, которая перемещалась электродвигателями посредством ходовых винтов координатного устройства, управляемого компьютером; для анализа турбулентных пульсаций в выемках использовались термоанемометры «ИРВИС ТА-5»; тепловизионные эксперименты проводились тепловизором NEC 7700 TH.

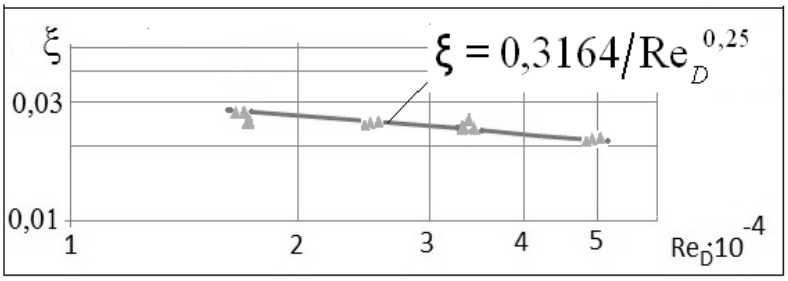
В главе 2 приведены также методики проведения экспериментов и обработки опытных данных. Относительная погрешность определения числа Re находилась в интервале ± 6,4%, числа Nu – в интервале ±15,3%; ξ - ±7,2% при доверительной вероятности 0,95.

В третьей главе диссертации приведены результаты тестовых опытов, результаты физических экспериментов по исследованию средней теплоотдачи на пластине с ДДВ и гидравлического сопротивления канала с этими выемками, полученные данные представлены уравнениями подобия. Проанализированы тепловая и энергетическая эффективность предложенного способа интенсификации теплообмена.

Тестовые опыты заключались в сравнении результатов экспериментов по средней теплоотдаче на гладкой пластине (рисунок 5 а) и гидравлическому сопротивлению гладкого канала (рисунок 5 б), выполненными на созданной экспериментальной установке, с известными зависимостями, полученными М.А.Михеевым и Г. Блазиусом.



а



б

Рисунок 5. Результаты тестовых опытов: а - средняя теплоотдача на гладкой пластине, б – гидравлическое сопротивление гладкого канала

Результаты проведенных экспериментов по средней теплоотдаче для матрицы с двухполостными диффузорными выемками описываются следующим уравнением подобия:

$$Nu_D = 0{,}080\ Re_D^{0,8}\ Pr^{0,43}.$$

Полученные опытные данные по средней теплоотдаче в канале с ДДВ сопоставлены на рисунке 6 с максимально достигнутыми значениями Nu_D для наиболее широко используемых пристенных интенсификаторов теплообмена.

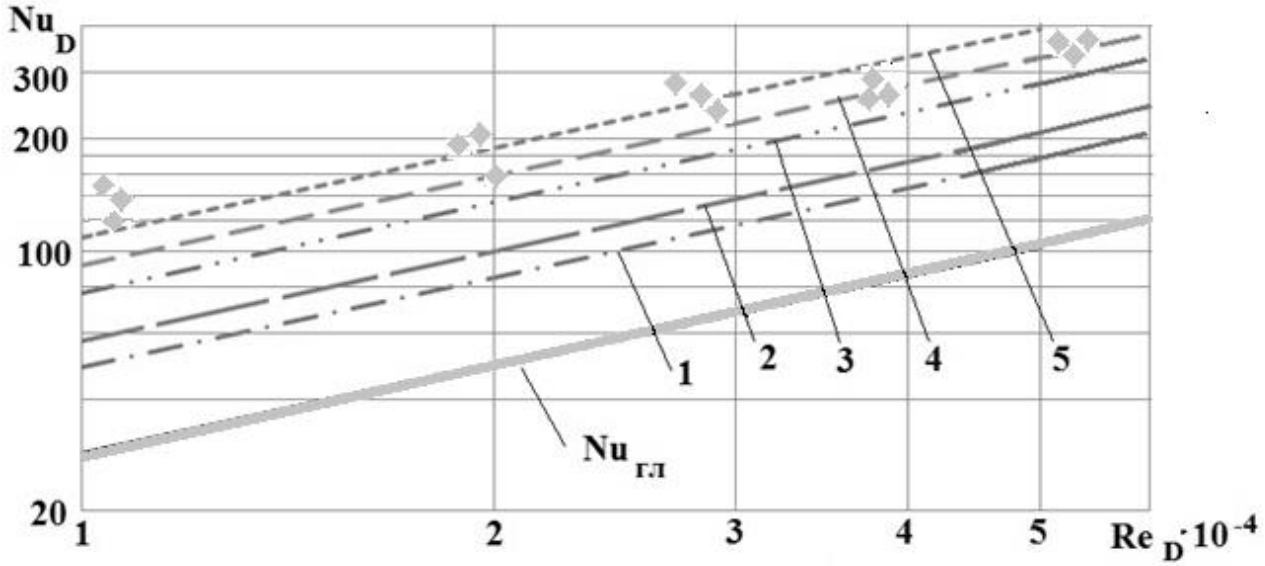


Рисунок 6. Результаты полученных опытных данных по средней теплоотдаче в канале с матрицей двухполостных диффузорных выемок, сопоставленные с максимально достигнутыми значениями Nu_D наиболее широко используемых пристенных интенсификаторов теплообмена: ♦ - экспериментальные данные для ДДВ, сплошная линия - уравнение М.А. Михеева для гладкого канала: $Nu_{гл}=0{,}021\ Re_D^{0,8}\ Pr^{0,43}$, 1- сферические выемки безотрывного типа (по обобщению А.В. Щукина), 2- кольцевые (поперечные) выступы (по данным Г.А. Дрейцера), 3- сферические выемки отрывного типа (по обобщению А.А. Халатова), 4- V-образные выемки (по данным C. Neil Jordan, Lesley M. Wright), 5- линия, полученная по результатам исследований ДДВ

Проведенное исследование подтверждает предположение о высокой тепловой эффективности ДДВ по сравнению с предельными значениями наиболее широко известных пристенных интенсификаторов теплообмена.Так, по сравнению с предельным приростом теплоотдачи при использовании традиционных СВОТ, дополнительное увеличение теплоотдачи, на пластине с ДДВ характеризуется коэффициентом 1,4. Этому способствует одновременное и непрерывное функционирование мощных самоорганизующихся вихревых структур в каждой из двух полостей выемки в условиях диффузорного возвратного течения.

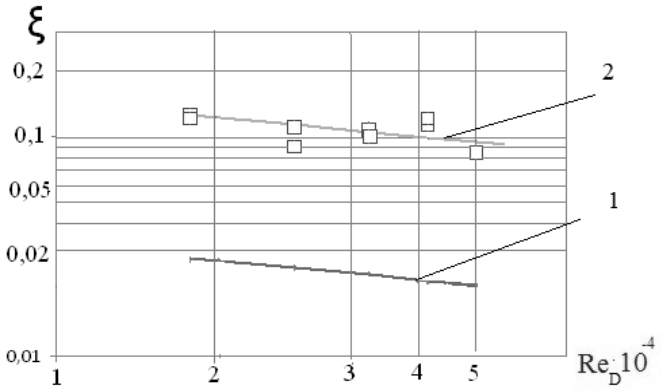


Рисунок 7. Результаты опытов по исследованию гидросопротивления в канале с ДДВ: 1-сплошная расчетная линия, полученная по уравнению Г. Блазиуса $\xi=0{,}3164/Re_D^{0,25}$, значки □, экспериментальные данные по ДДВ, 2-сплошная линия, полученная по результатам исследования ДДВ: $\xi=1{,}424/Re_D^{0,25}$

Результаты опытов по исследованию гидравлического сопротивления (рисунок 7) в канале с ДДВ были сопоставлены с другими интенсификаторами теплообмена в рамках параметра энергоэффективности $(Nu/Nu_{гл})_{Re}/(\xi/\xi_{гл})_{Re}$. Как следует из рисунка 8, для полученных в опытах предельных значений интенсификации теплообмена двухполостными диффузорными выемками в исследованных условиях, составляющих $(Nu/Nu_{гл})_{Re}$= 3,8, энергоэффективность $(Nu/Nu_{гл})_{Re}/(\xi/\xi_{гл})_{Re}$=0,84. При таком высоком уровне интенсификации теплоотдачи даже каналы с принудительной закруткой потока обладают значительно меньшей энергоэффективностью. А широко используемые сферические выемки отрывного типа, имеющие предельные значения $(Nu/Nu_{гл})_{Re}$ = 2,7, демонстрируют энергоэффективность 0,82 (рисунок 8).

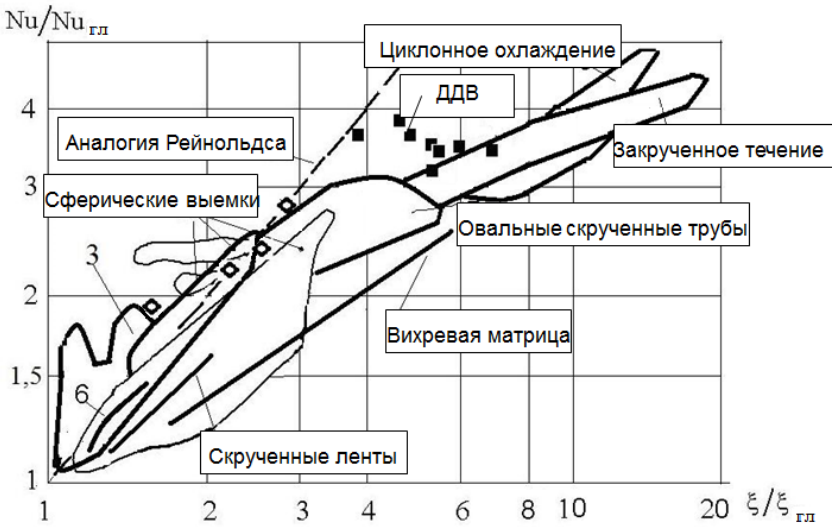


Рисунок 8. Энергетическая эффективность интенсификации теплообмена (по обобщению А.А. Халатова); ◊ - v-образные выемки (по данным C. Neil Jordan, Lesley M. Wright)

В четвертой главе диссертации рассмотрены результаты физического эксперимента по визуализации течений в двухполостной диффузорной выемке

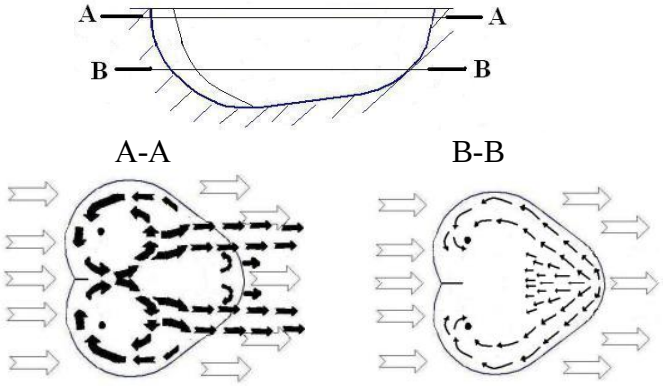
и данные по тепловизионным съемкам. Сделана экспериментальная оценка влияния высоты ребра-разделителя полостей в ДДВ. Сформулирована физическая модель дополнительной интенсификации теплообмена двухполостными диффузорными выемками. Представлены результаты сравнительных расчетов эффективности охлаждения турбинных лопаток.

На первом этапе исследований визуализация потоков проводилась при течении воды в плоском канале с односторонним расположением одиночной ДДВ в диапазоне изменения числа Рейнольдса Re_d = 800...10000, рассчитанного по гидравлическому диаметру выемки; относительные параметры интенсификатора и канала составляли: $h_{вх}/d_г$ = 0,34; $h_{вх}/H$ = 0,6; $H/d_г$ = 0,56.

Результаты визуализации течений в канале с водой позволили определить границы режимов течений в ДДВ. Установлено, что эти границы практически совпадают с данными |Ю.Ф.Гортышова, И.А. Попова и др.| для сферических выемок.

Отметим, что установленный в визуализационных экспериментах на турбулентном режиме течения факт непрерывного существования пары устойчивых самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур в ДДВ имеет принципиальное значение для процесса дополнительной интенсификации теплообмена и является важным фактором, отличающим ее от полусферической выемки и любой другой сферической выемки отрывного типа (h/d > 0,1…0,2).

Для турбулентного режима обтекания ДДВ были проведены визуализационные опыты на воздухе с использованием древесных опилок и шелковинок. Было установлено (рисунок 10), что в верхнем горизонтальном сечении по линии (А–А) при обтекании выемки потоком воздуха наблюдается взаимодействие обеих СКВС в полостях выемки. Образующееся в результате этого взаимодействия циркуляционное течение имеет вид цифры **8**.



Риунок 10. Схема течения воздуха в ДДВ по результатам его визуализации шелковинками и древесными опилками

Отметим, что циркуляция обеих вихревых структур осуществляется в противоположных направлениях, причем около боковых стенок это течение имеет возвратный характер. Формирование выходящего из выемки потока происходит в направлении внешнего потока по обе стороны от продольной плоскости симметрии ДДВ. При этом в придонной области (сечение по линии (В-В)) форма возвратного течения в ДДВ практически не отличается от формы возвратного течения в задней полусфере традиционной сферической выемки отрывного типа.

На рисунке 11 представлен полученный экспериментально график коэффициента давления в зависимости от высоты ребра-разделителя полостей, где

$$C_p = \frac{2 \cdot (p_i - p_{гл})}{\rho_\infty \cdot W_\infty^2}$$

График иллюстрирует эффект разрежения в области эпицентров вихревых структур в зависимости от относительной высоты ребра-разделителя полостей $\bar{b}$. Из графика следует, что при увеличении относительной высоты этого ребра интенсивность СКВС в полостях уменьшается. В то же время, без него самоорганизующиеся крупномасштабные вихревые структуры неустойчивы и нестабильны. По-существу, возникает задача поиска оптимальной высоты этого ребра, решение которой может способствовать дальнейшему увеличению эффективности ДДВ.

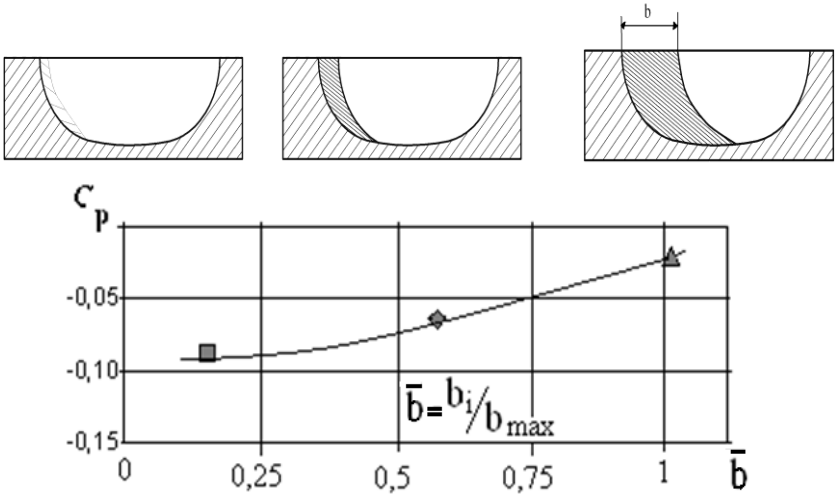


Рисунок 11. Исследование влияние высоты ребра-разделителя полостей на коэффициент давления в области эпицентров ДДВ

Распределение коэффициента давления C_p (рисунок 12) по поверхности полостей ДДВ показал наличие в возвратном течении знакопеременного продольного градиента давления. Сначала реализуется конфузорная форма

возвратного течения, схожая с СВОТ. Протяженность его составляет около 43% длины возвратного течения. Далее реализуется диффузорный участок протяженностью примерно 57% от длины возвратного течения, который отсутствует в сферических выемках отрывного типа. Что касается СВОТ, то в ней на всем своем протяжении возвратное течение имеет конфузорный характер.

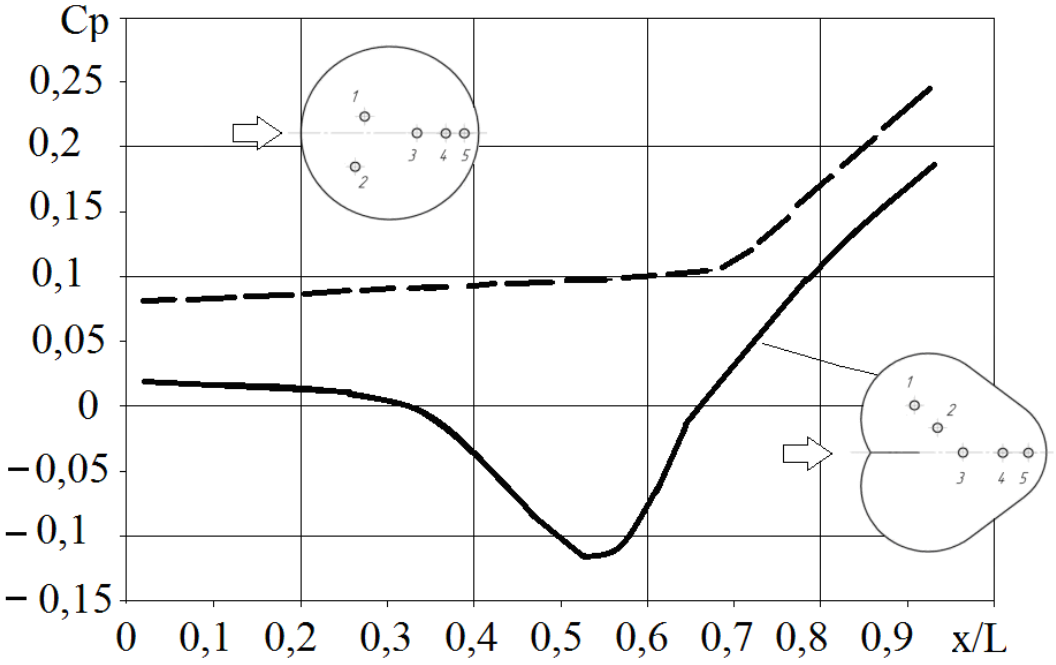


Рисунок 12. Распределение коэффициента давления C_p по поверхности ДДВ и ПСВ.

В четвертой главе диссертации выполнен также сравнительный качественный анализ температурного поля на поверхностях полостей ДДВ и СВОТ (рисунок 13, вид в плане). Тепловизионными измерениями показано, что в ДДВ интенсивное охлаждение обтекаемой воздухом поверхности происходит в областях выходной кромки, возвратного течения и в области СКВС. В то же время, СВОТ, как известно, характеризуется интенсивным охлаждением только в области выходной кромки.

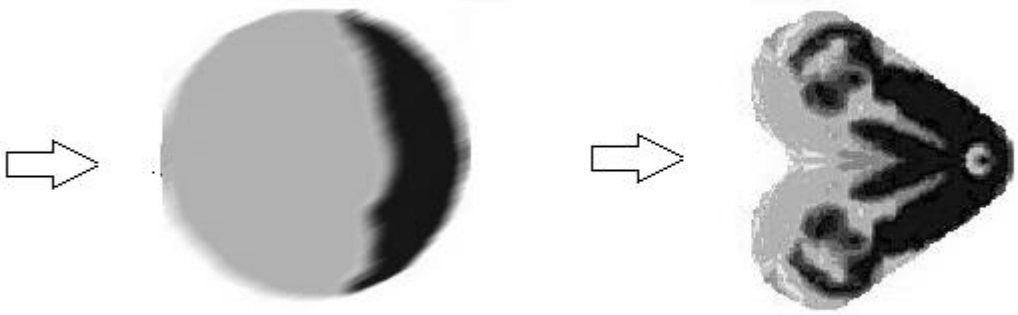


Рисунок 13. Участки с интенсивным охлаждением поверхности (черный цвет) на поверхности СВОТ и ДДВ в плане (Re_d = 10000)

В диссертации представлены рекомендации для расчета теплоотдачи в каналах с нанесенными на их поверхность матрицами двухполостных диффузорных выемок. Режим течения - турбулентный.

Результаты сравнительного расчета эффективности охлаждения рабочей лопатки с гладкими охлаждающими каналами (а), с нанесенными на стенки канала традиционными СВОТ (б) и с ДДВ (в) представлены на рисунке 14 .

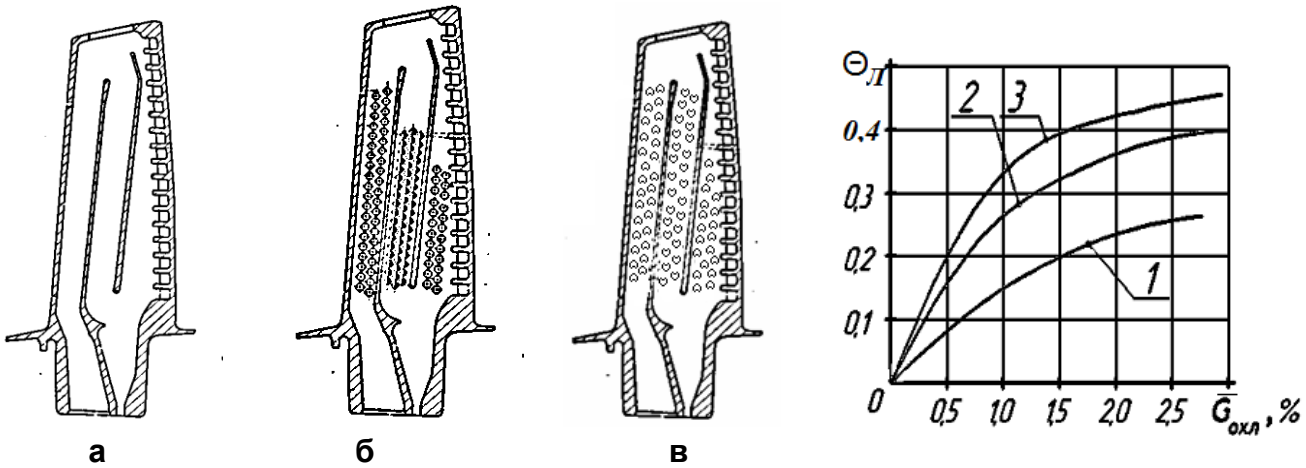


Рис.14. Результаты сравнительных расчетов эффективности охлаждения рабочий лопатки турбины по программе А.В. Ильинкова: а – гладкий канал, б – канал с СВОТ, в-канал с ДДВ

Результаты расчета показали, что для относительного расхода охлаждающего воздуха, подаваемого на один венец рабочих лопаток ($G_{охл}/G_{в.КВД}$), составляющего 2,5% и прочих одинаковых условиях, средняя по профилю эффективность охлаждения рабочей лопатки $\Theta_л = (T^*_г - T_л)/(T^*_г - T^*_{охл.вх})$ в случае гладких каналов составляет 0,25; с полусферическими выемками – 0,38, а с двухполостными диффузорными выемками – 0,44. Выполненные расчеты лежат в диапазоне чисел Re=10000-60000 при плотности расположения выемок f=0,35, относительной глубине выемки $h_{вх}/d_г = 0,34$; $H/d_г = 3,25$.

Для других геометрических параметров матрицы ДДВ при расчете средней теплоотдачи в первом приближении можно использовать формулу Ю.М. Анурова: $Nu/Nu_0 = 1 + 4,4[(h/d_{ДДВ})f]^{0,8}(H/d_{ддв})^{-0,6}$.

В исследованном нами диапазоне изменения чисел Рейнольдса $\xi=1,424/Re_D^{0,25}$. Для других геометрических параметров матрицы с ДДВ при расчете гидравлического сопротивления в каналах в первом приближении можно использовать обобщающее уравнение [Ю.Ф. Гортышова, И.А. Попова, А.В. Щелчкова].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан пристенный интенсификатор теплообмена повышенной эффективности (двухполостная диффузорная выемка), защищенный двумя патентами РФ; выбор его схемы и формы основан на известном диффузорном эффекте роста теплоотдачи и на использовании в выемке ребра-разделителя полостей.

2. Получены новые данные по средней теплоотдаче и уравнение подобие для пластины с матрицей ДДВ. Установлено, что максимальное увеличение теплоотдачи в канале с двухполостными диффузорным выемками, по сравнению с гладким каналом, составляет $Nu/Nu_{гл}$ = 3,8 раза. Это примерно в 1,4 раза больше, чем у лучших вариантов матриц со сферическими выемками при прочих равных условиях и в 1,2 раза больше, чем в канале с V-образными выемками.

3. Получены опытные данные по гидравлическому сопротивлению канала с ДДВ. Анализ распределения коэффициента давления C_p в полостях ДДВ показал, что характер возвратного течения сначала – конфузорный и составляет около 43% длины возвратного течения; далее реализуется диффузорный участок протяженностью около 57% от общей его длины, который отсутствует в сферических выемках отрывного типа.

4. Визуализационными исследованиями установлены режимы течения в ДДВ, классифицированные по диапазонам значений чисел Рейнольдса; впервые получены основные параметры самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур, образующихся в ДДВ; выявлено влияние ребра-разделителя полостей ДДВ. Обнаружена новая форма взаимодействия двух самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур соседних полостей ДДВ с траекторией циркуляции в форме цифры **8**.

5. Сформулирована физическая модель высокой интенсивности теплообмена на поверхности с ДДВ, основанная на непрерывном функционировании двух самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур и на диффузорном характере части возвратного течения в обеих полостях. Тепловизионными исследованиями определены области обтекаемой поверхности ДДВ с высокой интенсивностью охлаждения.

6. Выявлено, что для максимальных значений интенсификации теплообмена двухполостными диффузорными выемками, составляющих $(Nu/Nu_{гл})_{Re}$ = 3,8, энергоэффективность $(Nu/Nu_{гл})/(\xi/\xi_{гл})$ = 0,84. Для сферических выемок эти значения составляют 2,7 и 0,82 соответственно. Установлено, что

разработанный и исследованный интенсификатор превосходит по тепловой эффективности и другие известные пристенные интнсификаторы теплообмена.

7. Разработаны рекомендации для расчета теплообменных каналов с использованием ДДВ на турбулентном режиме течения; сравнительными расчетами охлаждаемых турбинных лопаток с такими интенсификаторами продемонстрирован высокий уровень эффективности их охлаждения.

Основные обозначения

H – высота канала; h – глубина двухполостной диффузорной выемки; d – диаметр двухполостной диффузорной выемки в плане; $D_г$ –гидравлический диаметр канала; Re_d, Nu, – числа Рейнольдса, Нуссельта определенные по диаметру канала и выемки; $T_г^*{}_w$ – температура торможения газового потока в турбине в относительном движении; p_i , $p_{гл}$ – статические давления в i-й точке на поверхности выемки и на исходной гладкой поверхности перед выемкой; $\Theta_л$ – эффективность охлаждения лопатки, К-коэффициент ускорения потока; СВОТ – сферические выемки отрывного типа; ДДВ – двухполостная диффузорная выемка.

Содержание диссертации опубликовано в работах:

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. *Хабибуллин, И.И.* Исследование теплообменной поверхности с двухполостными диффузорными выемками в прямоугольном канале / А.В. Ильинков, И.И. Хабибуллин, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев // Энергетика Татарстана, Казань, 2015- №4. - С.68-74.
2. *Хабибуллин, И.И.* Особенности обтекания двухполостных выемок/А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев, И.И. Хабибуллин, В.Г. Ильинкова // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, Казань, 2014-№2.-С.53-57.
3. Патент на полезная модель №148172 РФ, U1 F28F3/00. Теплообменная поверхность (варианты)/ И.И. Хабибуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев (Россия). - № 2014120548/06; Заявлено 21.05.2014; Опубл. 27.11.2014, бюлл. № 33.
4. Патент на изобретение №2569540 РФ, C1 F28F3/00, F15D1/10. Теплообменная поверхность (варианты)/ И.И. Хабибуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев (Россия). - № 2014120547/06; Заявлено 21.05.2014; Опубл. 27.11.2015, бюлл. № 33.

Работы, опубликованные в других изданиях:

5. *Хабибуллин, И.И.* Разработка пристенного интенсификатора теплообмена для охлаждения турбинных лопаток / И.И. Хабибуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев // Тезисы докладов и сообщений XV

Минского Междунар. форума по тепло- и массообмену, НАН Беларуси, Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, г. Минск, 23-26 мая 2016 г., - Минск, 2016. - Т.1. - С.229-232.

6. *Хабибуллин, И.И.* Особенности обтекания двухполостных и диффузорных выемок / А.В. Ильинков, А.В. Щукин, И.И. Хабибуллин, В.В. Такмовцев //Тезисы Шестой Рос. нац. конф. по теплообмену. МЭИ, г. Москва, 27-31 октября 2014 г. – М., 2014 - Т.3. - С.54-55.

7. *Хабибуллин, И.И.* Теплоообменная поверхность с двухполостными диффузорными выемками / И.И. Хабибуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев // Тезисы докладов XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках», МЭИ, г. Звенигород, 24-29 мая 2015 г. – М., 2015. - С.277-278.

8. *Хабибуллин, И.И.* Теплоотдача и визуализация потока в канале с двухполостными диффузорными выемками / И.И. Хабибуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев // Тезисы докладов V Междунар. конф. «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках», г. Казань, 19-21 октября 2015 г. – Казань, 2015. - С.112-113.

9. *Хабибуллин, И.И.* Гидродинамика обтекания двухполостной диффузорной выемки / И.И. Хабибуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев, С.С. Титов, М.Дж. К. Аббас // Материалы IX Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, г. Казань, 9-11 сентября 2014 г. – Казань, 2014. - С.187-191.

10. *Хабибуллин,И.И.* К интенсификации теплоотдачи в охлаждающих каналах турбинных лопаток / А.В. Ильинков, А.В. Щукин, И.И. Хабибуллин, В.В. Такмовцев // Тезисы Междунар. научно-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». СНИУ им. акад. С.П. Королева, г. Самара, 22-24 июня 2016 г. – Самара, 2016. – С.78-79

11. *Хабибуллин, И.И.* Гидродинамика и теплообмен при обтекании поверхности с двухполостными диффузорными выемками / И.И. Хабибуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев// Тезисы докладов научно-практич. конф. «Энергетика, экология, энергосбережение». ЗАО НПВП «Турбокон», г. Калуга, 16-18 мая 2016 г. – Калуга, 2016. - С.31-34.

12. *Хабибуллин, И.И.* Пристенная интенсификация тепломассообмена с помощью двухполостных выемок / И.И. Хабибуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин // Материалы VII Междунар. научно-практич. конф. «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке». МНО «Prospero», г. Москва, 29 июля 2014 г. – М., 2014. - №2. - С.73-75.

13. *Хабибуллин, И.И.* Интенсификация вихреобразования в полусферической выемке / И.И. Хабибуллин, И.Д. Хакимуллин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин// Материалы Междунар. молодежной научной конф. «XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых)», г. Казань, 19-21 ноября 2013 г. – Казань, 2013. - Т.2. - С.303-304.

14. *Хабибуллин, И.И.* Теплоотдача на пластине с двухполостными диффузорными выемками / И.И. Хабибуллин, В.В. Такмовцев, Р.А. Бахтин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин// Сборник докладов Междунар. молодежной научной конф. «XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых)», г. Казань, 19-21 октября 2015 г. – Казань, 2015. - Т.2. - С.502-506.

15. *Хабибуллин, И.И.* Визуализация течения при обтекании двухполостной диффузорной выемки / И.И. Хабибуллин, В.В. Такмовцев, М.Д.К. Аббас, А.В. Ильинков, А.В. Щукин// Сборник докладов Международ. молодежной научной конф. «XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых)», г. Казань, 19-21 октября 2015 г. – Казань, 2015. - Т.2. - С.507-510.

16. *Хабибуллин, И.И.* Теплоотдача, сопротивление и энергоэффективность канала с двухполостными диффузорными выемками / И.И. Хабибуллин, Р.А. Бахтин, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, В.В. Такмовцев // Материалы X Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, г. Казань, 13-15 сентября 2016 г. – Казань, 2016. - С.230-233.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая
Усл. печ. Л. 1,16. Тираж 100. Заказ А55

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, г. Казань, К.Маркса, 10